新石器时期中国先民音乐调音技术水平的乐律数理分析

——贾湖骨笛特殊小孔的调音功能与测音结果研究

夏 季、徐 飞、王昌燧

自闻名于世的贾湖骨笛精品M282:20发现以来,不少音乐工作者都对它做过研究。但目前为止学术界对该骨笛上特殊小孔的成因和功能还没有形成统一看法。本文按自然科学研究中通用的数据处理方法,以已经发表的两次测音数据为依据,对M282:20号骨笛测音结果进行了较全面的数理分析。同时运用计算机软件将发表在《Nature》网站(www.nature.com)上的由该骨笛演奏的民歌《小白菜》进行了动态测音。通过比较研究,基本推定:该骨笛上的特殊小孔系调音孔,其主要功能包括:1. 调节大7孔音高;2. 调整骨笛音阶关系;3. 改善骨笛音准;4. 使骨笛较为容易实现旋宫转调。可以认为,贾湖骨笛上的特殊小孔,记录了中国原始音乐声学的一个技术高峰。

一、引　　言

1987年5月14日,在河南贾湖新石器早期遗址M282发现了完整的7孔骨笛,后被编号M282∶20。发掘者携M282∶20号骨笛到北京请音乐家鉴定,中国艺术研究院音乐研究所民族民间音乐研究室主任萧兴华肯定它是吹奏乐器骨笛,并请中央民族乐团笛子演奏家宁保生用斜吹方法试奏成功①。可以说,M282∶20号骨笛是最早被学术界认识和研究的骨笛之一。

M282∶20骨笛发现于该遗址中期,遗址距今约在8350年至8150年。管开7孔外加一特殊小孔(本文名为“小7孔”,图见封二),制作技术较为成熟,能吹奏六声或七声音阶,在贾湖遗址已出土骨笛中,“其骨质最为精良,制作水平最高,音质也最优美”,“是贾湖遗址出土精品之一,代表着贾湖音乐文化的最高水平。”②

迄今为止,对M282∶20骨笛原件共进行了两次测音。第一次是1987年11月3日,黄翔鹏、童忠良、萧兴华、徐桃英等人的测音,结果发表在《文物》杂志1989年第1期上。第二次是1992年6月萧兴华、顾伯宝等人的测音,结果发表在科学出版社1999年出版的《舞阳贾湖》报告中。两次测音形成数据两大组12小组。其中开放小7孔6组,堵上小7孔5组,分别测大小7孔的1组。这些数据均公开发表,但更为深入的研究仍不多见。

贾湖骨笛在中国声学史、中国古代音乐史,乃至世界音乐史上都占有重要地位。1999年经中国科大科技考古研究室与国外专家合作努力,英国《自然》(Nature)杂志以《世界上最早的至今仍可演奏的乐器》③为题报道了贾湖骨笛的消息,并在其网站发布了由M282∶20号骨笛演奏的乐曲《小白菜》,从而引起全世界各大媒体普遍关注。

感谢国家自然科学基金(项目号**10174074**)、教育部博士点专项基金(项目号**20010358024**)资助。

① 《舞阳贾湖》,科学出版社1999年版,第992页以及图版四。

② 同注①,第1007页。

③ JZ Zhang, Garman Harbottle, CS Wang, ZC Kong *Oldest playable musical instruments found at Jiahu early Neolithic site in China, Nature 401*, 366—368 (23 September 1999).

音乐学界黄翔鹏先生最先发表对 M 282∶20 骨笛的研究文章，他系统研究了 M 282∶20 号骨笛的测音数据，并对骨笛上小 7 孔的作用做了初步推测，认为 M 282∶20 号骨笛可以演奏清商六声音阶或下徵调七声音阶。

其后，萧兴华先生对贾湖骨笛进行了长期研究，他对 M 282∶20 的制作过程，小 7 孔成因，与其他骨笛的关系以及贾湖骨笛的发展过程等均有系统阐述[④]。但关于小孔调音的问题，尚未形成有说服力的结论，萧先生也希望对 M 282：20 上的小孔问题做深入研究。另外，还有一些学者对贾湖骨笛做过研究，形成了一批有价值的成果。

随着计算机测音分析技术不断进步，在已有研究的基础上，我们已经有可能对 M 282∶20 做进一步探索。目前，关于 M 282：20 号骨笛上小 7 孔的成因及作用，学术界没有形成统一的认识。黄翔鹏先生认为是先开大 7 孔，后开小孔，小孔的作用是对大孔调音，他说“我以为应系钻孔过低再打小孔进行校正的，从指法上说也不应该是音阶的另一音级”[⑤]。而萧兴华先生则根据骨笛的制作过程推断小 7 孔是在制笛过程中留下的计算孔位，由于此音略高，因此在下方重新开了一个正式孔[⑥]，即先开小 7 孔，后开大 7 孔，小孔是根据计算而打的孔。

本文试图通过对 M 282∶20 号骨笛测音数据的量化研究，形成对小 7 孔更准确的分析，以期进一步认识小 7 孔的作用。

二、M 282∶20 号骨笛测音数据预处理

2.1　小孔基本状况

图一是骨笛 M 282：20 的尺寸墨线图，图中标明了骨笛的尺寸、大小，音孔位置、大小、编号顺序等[⑦]。音孔序号从吹口起依次是：1 孔、2 孔……小7 孔、大 7 孔。小 7 孔孔径 0.15 厘米，距大 7 孔 0.44 厘米。由管乐器发声基本原理可知，小 7 孔较小的孔径决定其单独发声较难；位于 6 孔、大 7 孔之间，它的发音必然较 6 孔低，较 7 孔高。以下测音数据也证实了这一点。

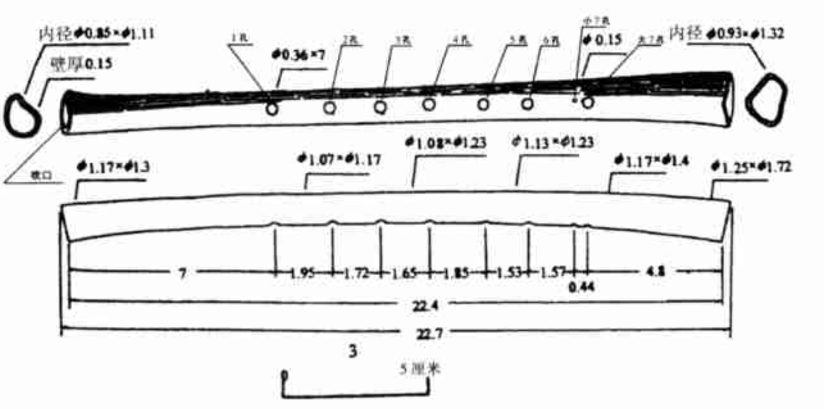


图　一

2.2　测音数据会校

以下是 M 282：20 骨笛两次测音数据一览表。其中表 1 至表 4 是第一次的测音结果，摘自黄翔鹏《舞阳贾湖骨笛的测音研究》一文。表 5 到表 12 是第二次测音结果，摘自《舞阳贾湖》一书第九章（单位：音分）。

表 1　开小 7 孔

音孔位	上行	下行
1孔	♯A6－42	♯A6－42
2孔	G6－40	G6－50
3孔	E6＋16	E6＋21
4孔	D6＋16	D6＋14
5孔	C6＋24	C6＋22
6孔	B5－25	B5－39
7孔	A5＋8	A5＋13
筒音	♯F5＋44	♯F5＋52

表 2　开小 7 孔

音孔位	上行	下行
1孔	♯A6－15	♯A6－63
2孔	G6－36	G6－63
3孔	E6＋22	E6＋0
4孔	D6－1	D6－1
5孔	C6＋15	C6＋0
6孔	♯A5＋49	♯A5＋43
7孔	A5－20	A5－10
筒音	♯F5－30	♯F5＋29

④　同注①，骨笛研究。

⑤　黄翔鹏《舞阳贾湖骨笛的测音研究》，《文物》1989（1）。

⑥　同注①，第 1008 页。

⑦　同注①，图 346。

表 3　开小 7 孔

音孔位	上行	下行
1孔	A6＋36	A6＋14
2孔	G6－45	G6－74
3孔	E6－4	E6－15
4孔	C6＋1	D6－8
5孔	C6－12	C6＋5
6孔	B5－49	B5－40
7孔	A5＋9	A5＋0
筒音	G5＋28	#F5＋32

表 4

音孔位	上行	下行
1孔	A6－36	A6－47
2孔	#F6＋3	#F6＋36
3孔	E6－44	E6－20
4孔	D6－51	D6－20
5孔	C6－37	C6＋0
6孔	B5－60	B5－47
7孔(小)	A5－11	A5－12
7孔(大)	#G5＋16	#G5－18
筒音	#F5＋16	#F5＋18

表 5　堵小 7 孔

音孔位	上行	下行
1孔	A6＋45	#A6－19
2孔	#F6＋45	G6－19
3孔	E6＋8	E6＋48
4孔	D6＋8	D6＋40
5孔	C6＋24	C6＋40
6孔	B5－35	B5－11
7孔	A5－15	A5－11
筒音	#F5＋46	#F5＋46

表 6　堵小 7 孔

音孔位	上行	下行
1孔	#A6－18	#A6－18
2孔	#F6＋45	G6－18
3孔	E6＋11	E6＋45
4孔	D6＋11	D6＋45
5孔	C6＋35	C6＋45
6孔	B5－22	B5－7
7孔	A5－4	A5＋2
筒音	#F5＋50	#F5＋69

表 7　堵小 7 孔

音孔位	上行	下行
1孔	#A6－34	#A6－18
2孔	G6－40	G6－18
3孔	E6＋13	E6＋37
4孔	D6＋10	D6＋37
5孔	C6＋15	C6＋37
6孔	B5－30	B5－30
7孔	A5－4	A5－13
筒音	G5－40	G5－40

表 8　堵小 7 孔

音孔位	上行	下行
1孔	A6－39	A6－20
2孔	#F6－34	#F6－34
3孔	E6－46	E6－34
4孔	D6－46	D6－34
5孔	C6－10	C6－50
6孔	B5－52	#A5＋18
7孔	A5－31	#G5＋23
筒音	#F5－31	#F5－10

表 9　堵小 7 孔*

音孔位	上行	下行
1孔	A6－30	A6－30
2孔	#F6－30	#F6－40
3孔	E6－30	E6－45
4孔	D6－30	D6－45
5孔	C6－30	C6－33
6孔	B5－82	B5－65
7孔	A5－60	A5－55
筒音	#F5－10	#F5－2

*原书为“开小 7孔”，但数据明显不入列，后向作者咨询得知，此为一处印刷错误，应为堵小 7 孔。

表 10　开小 7 孔

音孔位	上行	下行
1孔	A6＋25	A6＋25
2孔	#F6＋4	#F6＋25
3孔	E6－32	E6－5
4孔	D6－32	D6－5
5孔	C6－16	C6－5
6孔	B5－43	B5－48
7孔	A5－11	A5－9
筒音	#F5＋8	#F5＋13

表 11　开小 7 孔

音孔位	上行	下行
1孔	A6＋39	A6＋39
2孔	#F6＋39	#F6＋45
3孔	E6＋1 *	E6＋15 *
4孔	D6＋10	D6＋17
5孔	C6＋10	C6＋8
6孔	B5－33	B5－33
7孔	A5＋10	A5＋5
筒音	#F5＋40	#F5＋35

*经向作者咨询，原书 F6＋1、F6＋15 为印刷错误，应为 E6＋1、E6＋15。

表 12　开小 7 孔

音孔位	上行	下行
1孔	A6＋40	A6＋40
2孔	#F6＋40	#F6＋40
3孔	E6－9	E6＋6
4孔	D6－9	D6＋2
5孔	C6＋4	C6＋2
6孔	B5－41	B5－40
7孔	A5－1	A5＋0
筒音	#F5＋34	#F5＋37

2.3　两次测音数据之间的横向比较

鉴于音乐测音数据的随机型漂移，考虑到科学实验数据处理的基本规范，为便于比较和观察，也为了消除单独的一组数据而可能带来的随机误差，我们将每次测音的同一类数据求平均值，然后用平均值来比较。

表 13

小 7 孔常开时两次测音的对比

（单位：音分）

音孔位	第一次测音	第二次测音	误差
1孔	A6＋48	A6＋35	13
2孔	#F6＋49	#F6＋30	19
3孔	E6＋7	E6－4	11
4孔	D6＋4	D6－3	7
5孔	C6＋9	C6＋1	8
6孔	B5－42	B5－40	2
7孔	A5	A5－1	1
筒音	#F5＋25	#F5＋28	3

由上表可见，小 7 孔常开，两次测音数据基本吻合，它们之间的最大误差也不超过 20 音分，这个误差普通人耳难以觉察。这也说明两次测音的结果相互印证，准确可信。要特别说明的是，表 3 中的筒音 G5＋28 和其他的音相比偏差明显过大，和其他数据平均值也有 100 多音分的误差，怀疑是印刷错误或是某些特殊原因造成，故暂未作为统计因子考虑。

表 14

小 7 孔闭合时两次测音的对比

（单位：音分）

音孔位	第一次测音	第二次测音	误差
1孔	A6－42	A6＋32	74
2孔	#F6＋20	#F6＋26	6
3孔	E6－32	E6	32
4孔	D6－35	D6＋4	39
5孔	C6－19	C6＋5	24
6孔	B5－54	B5－42	12
7孔	#G5－1	A5－27	74
筒音	#F5＋17	#F5＋28	11

从表 14 可以看出，闭合小 7 孔时，两次测音数据虽大致吻合，但它们之间的误差显然要比小 7 孔常开时大的多。特别是第 1 孔和第 7 孔，出现了 74 音分的偏差。在数据统计分析过程中，我们还发现，闭合小 7 孔时，

即使同一次测音，每一个孔的音高变化都较大，不同组数据之间的偏差经常可以达到 100 音分以上，数据较为分散。造成这种现象的原因应该是，小 7 孔闭合时，其他若干音孔也不易吹奏，从而造成吹奏时气流不易把握，发音不稳，偏差较大。这一发现对推测小 7 孔作用十分重要，至少可以说明，小 7 孔具有改善音准的重要作用。

三、小 7 孔调音技术的乐律数理分析

3.1 小 7 孔对骨笛整体发音的影响

表 15 （单位：音分）

音孔位	开小 7孔	堵小7孔	偏差
1孔	A6＋41	A6＋20	21
2孔	#F6＋40	#F6＋25	15
3孔	E6＋1	E6－7	8
4孔	D6	D6－2	2
5孔	C6＋5	C6＋2	3
6孔	B5－41	B5－44	3
7孔	A5－1	A5－39	38
筒音	#F5＋27	#F5＋26	1

表 15 是将所有两次测音数据求均值所得，从有无小孔造成的音高偏差可以看出，开小 7 孔后，主要影响的是大 7 孔的发音，使其从原来的 A5－39 改善为 A5－1，其他音孔的音高几乎不受影响。从数据的离散状况分析，我们还发现：开小 7 孔后，骨笛发音更为稳定，多次测音之间的平均误差更小，测音数据更加收敛于某一特征值。

3.2 小 7 孔对骨笛音程关系的影响

由于演奏者、演奏环境的不同，以及演奏者主观意向的影响等等，都可能造成演奏时音高的系统误差。如表 6 的测音数据普遍要比表 5 要高。但是，器乐声学原理表明，演奏者可以通过吹奏技巧，人为改变某一两个音孔的发音，却无法全面改变各孔之间的音程和音阶关系。有鉴于此，各音孔之间的音程差就更能反映骨笛所能达到的音乐科技水平。根据这一思想，在研究骨笛音程关系时，我们以每一组测音数据为根据，分别算出音程差，然后将所有的音程差求平均。需要说明的是，不应该先将音高值求平均然后再算音程差，这一处理思路十分关键。表 16 到表 18 是两次测音每组数据的音程表（单位：音分）。

表 16 （单位：音分）

音孔位	堵小7孔	堵小7孔	堵小7孔	堵小7孔	堵小7孔
1—2孔	300	300	337	300	294
2—3孔	237	233	235	237	247
3—4孔	200	208	200	200	203
4—5孔	184	200	176	200	195
5—6孔	159	151	157	152	145
6—7孔	180	200	182	191	174
7—筒音	261	257	246	233	236
音孔位	堵小7孔	堵小7孔	堵小7孔	堵小7孔	堵小7孔
1—2孔	300	300	310	295	286
2—3孔	245	200	195	212	200
3—4孔	200	200	200	200	200
4—5孔	200	200	212	164	184
5—6孔	167	152	132	142	132
6—7孔	183	178	190	179	195
7—筒音	227	250	247	300	233

表 17

（单位：音分）

音孔位	开小7孔	开小7孔	开小7孔	开小7孔	开小7孔
1—2孔	321	300	300	294	300
2—3孔	236	230	229	230	249
3—4孔	200	200	191	198	200
4—5孔	216	200	200	209	187
5—6孔	127	143	143	141	145
6—7孔	168	161	157	162	160
7—筒音	281	278	270	270	265

表 18

（单位：音分）

音孔位	开小7孔	开小7孔	开小7孔	开小7孔	开小7孔	开小7孔	开小7孔
1—2孔	300	298	308	321	300	281	288
2—3孔	234	244	229	242	237	259	241
3—4孔	204	200	207	223	201	195	193
4—5孔	200	192	192	184	199	213	187
5—6孔	142	149	161	166	157	137	145
6—7孔	160	167	148	169	153	142	160
7—筒音	263	264	261	310	261	381	268

如前所述，小 7 孔只对大 7 孔的发音有较大影响，所以，小 7 孔也主要影响 6 孔至 7 孔以及 7 孔至筒音之间的音程。见下表。

表 19

（单位：音分）

音孔位	标准音程	平均值（开小7孔）	误差	平均值（堵小7孔）	误差
1—2孔	300	301	1	302	2
2—3孔	200	238	38	224	24
3—4孔	200	201	1	201	1
4—5孔	200	198	－2	192	－8
5—6孔	100	146	46	149	49
6—7孔	200	157	－43	185	－15
7—筒音	300	281	－19	249	－51

以上数据清楚表明，小 7 孔主要影响 6 孔—7 孔和 7 孔—筒音之间的音程差，而其他各音程两组数据之间最大误差也只有 12 音分，其余误差均在 10 音分以内。打开小 7 孔使 6 孔到 7 孔之间的音程减小了，从而使它和标准音程十二平均律全音 200 音分之间的误差增加了 28 音分；同时，打开小 7 孔使 7 孔到筒音之间的音程增加了，从而使它和十二平均律小三度 300 音分之间的误差减少了 32 音分。也就是说，开了小 7 孔以后，减小了一个音程误差，但同时，又增大了一个音程误差，这一来一回，相互抵消，开小七孔似乎并没有改善骨笛的音程关系。

但是，如果我们再仔细看一下小 7 孔常开状态下测音数据的平均值，就会有新的发现。见下表。

表 20

（单位：音分）

发音孔号	筒音	7	6	5	4	3	2	1
开小7孔发音	#F5＋27	A5－1	B5－41	C6＋5	D6	E6＋1	#F6＋40	A6＋41

音程差	281	157	146	198	201	238	301
偏差	19	－43	46	－2	1	38	1

5孔至6孔的音程近似为一个四分之三音，6孔至7孔的音程也近似为一个四分之三音。而5孔至7孔的音程303音分就接近一个小三度。这似乎是一个非常有趣的变化。也就是说，小7孔的出现，不仅使7孔到筒音的音程误差减小到可以忽略的地步，而且，使5孔至7孔间形成了一个小三度音，为了使骨笛能演奏更为细腻的音乐，在5孔和7孔间的等音程位置还有一个6孔，它和5孔、7孔间分别形成一个中立音。中国一些戏曲和民间乐器常于音阶或调式中使用四分之三音；这种四分之三音常由于在调式——例如五声徵调式——中小三度之间加入中立音而产生[⑧]。可以说，小7孔不仅改善了7孔音的音高，而且还改变了骨笛的音阶结构，从而形成接近150音分的四分之三音，又称中立音。由中立音还可以派生出四分音（即半音之半，50音分）和四分之五音（即全音加上四分音）之类音程。这一类特殊音程的出现将使骨笛演奏的乐曲极具特色，很类似于阿拉伯音乐，至今这类特殊音程仍是阿拉伯民族音乐的共同特征[⑨]。

当然，我们也不能过高估计原始先民的音乐技术水平，但通过小7孔，使其余各孔发音准确容易，同时也创造了第6孔的中立音，使骨笛音乐表达能力更加丰富，应该是骨笛创造者乐于接受的，正因为如此，这根骨笛能够被长久保存使用直至带入墓葬也就容易理解了。

从上表还可看出，M 282：20号骨笛的主音如由第4孔发出，它和现在国际通用的标准音高系列C6只差了200音分，正好为一个全音，开小7孔以后，使7孔发音调整为和该主音D6相谐调的A5－1[⑩]，九千年前的古人和现代人在音乐感触上如此接近，也许不完全是巧合。

3.3　小7孔成因分析

如前所述，关于小7孔的成因有两种看法。黄翔鹏先生认为“应系钻孔过低再打小孔进行校正的，从指法上说也不应该是音阶的另一音级”[⑪]，即先开大孔，后开小孔，小孔的作用是对大孔校音。萧兴华先生则认为“在开孔的过程中，一方面靠长期的经验，一方面根据计算的钻点进行开孔位置的调整，其中小7孔正是在制笛过程中留下的计算孔位，由于此音略高，因此在下方又重新开了一个正式孔”[⑫]，即先根据计算开小孔，发现小孔音不准，再重新开一大孔。

其实，小孔成因，应当在骨笛测音数据中有所体现。具体是如何体现的呢？我们不妨先按黄翔鹏先生的观点，看看测音数据会有什么特点。

如果古人是先开大孔，后开小孔，小孔为调整大孔发音而设，那么堵上小7孔时大孔发音必然不准，否则，就没有必要开小7孔；既然开小孔是为了校音，那么开小孔后，大7孔的发音必然有所改善。按此逻辑，回头看上面的研究数据。A．堵上小7孔时，骨笛的整体发音都较为不稳定，单个音孔的发音误差经常可以达到100音分以上。开了小7孔后，骨笛整体发音趋于稳定，单个音孔的发音误差一般都在20音分以内；B．堵上小孔时，7孔和筒音之间的音程误差达到51音分，而打开小7孔后，这个误差减少到了19音分；C．小7孔的出现还将大7孔的音高由原来的A5－27调整到了和C6相谐调的A5音；D．小7孔系统改变了整个骨笛的音阶结构，使5孔，7孔间形成了一个小三度，6孔和5孔、7孔间形成了两个四分之三音（中立音）；E．开小7孔超吹后，骨笛可以进行旋宫转调而音高保持相对准确，这一点，通过仿制品的实际演奏也可以证明，若无小孔，则超吹难以进行。

由以上A、B、C、D、E五点可以看出，增开小7孔后，确实改善了骨笛的发音状况，使骨笛的发音更加稳定和准确，并较为容易地实现了旋宫转调。也就是说，测音数据很好地支持了黄翔鹏的观点。

为慎重起见，我们也同步验证一下第二种观点，即认为先开小7孔，后开大7孔。如果先开小7孔，那么单独的小孔发音必然不准，且达到不能容忍的地步，当时的制作者才会想到另开一孔，但实际的测音数据表明，小孔单独的发音并不是想像中的那么不准，见表21。

---

⑧　缪天瑞《律学》，人民音乐出版社1996年第三版，第236页。

⑨　同注⑧，第214页。

⑩　同注①，第1012页。

⑪　同注⑤。

⑫　同注①，第1008页。

表 21

（单位：音分）

音孔位	小7孔发音上行	小7孔发音下行	小7孔发音平均	误差
6孔—小7孔	149	175	162	38
小7孔—筒音	274	270	272	28
音孔位	堵小7孔时，大7孔的发音（平均）			误差
6孔—小7孔	185			15
大7孔—筒音	249			51

通过表中对比不难发现，单独小 7 孔的发音和大小 7 孔同时打开时的音高相差并不大，只是要让小 7 孔独立发音，肯定要比大小 7 孔同时打开时要难。由管乐器发音原理——骨笛空气柱振动发音，开孔位置决定空气柱长度，也就决定了该孔发音频率——大小 7 孔同时打开时，由于小 7 孔更靠近吹口，所以发音也更多地取决于小 7 孔的发音，测音数据也表明了这一点。由此可知，要想通过增开大 7 孔来改善骨笛音程关系，就必须堵上小 7 孔，否则，大小孔同时打开，发音频率仍然会受小 7 孔影响。由表 20 对比大小 7 孔发音可见，堵上小 7 孔后 6 孔至 7 孔之间的音程误差似乎有所减小（减小 23 音分），但它又大大增加了 7 孔到筒音的音程误差（增大 23 音分）。因此说，如果是后开的大 7 孔，则并没有使骨笛的音程关系有任何改善。

由于小 7 孔发音并不是想像中的那么不准，更何况在对小孔扩孔的过程中，还可以对小孔的音高进行微调，从而使小孔的发音更趋准确；大孔的增开也并没能改善骨笛的音程；那么，古人如果先开了小孔，也就既没必要、也没理由再去增开大 7 孔了。

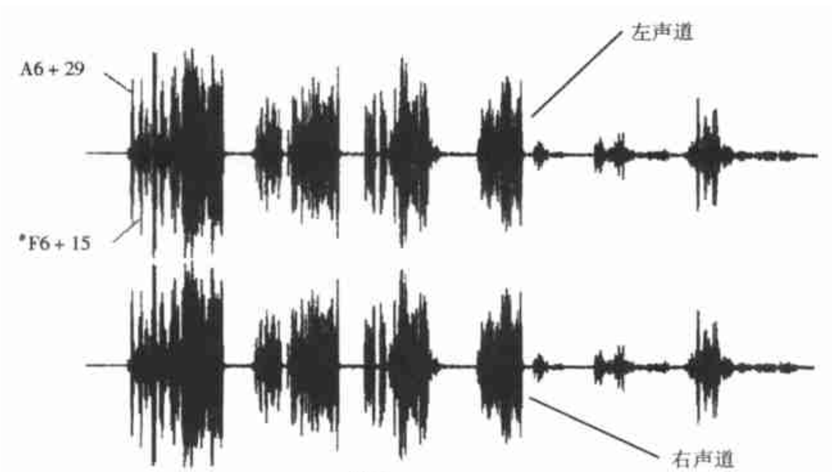
通过以上数据分析和逻辑论证，我们倾向于支持黄翔鹏先生的观点，即：在骨笛制作过程中，古人是先开大 7孔，当整个骨笛完成后，发觉该孔发音偏低，所以增开小 7 孔对其进行调音，小 7 孔作为调音孔，无意之中成为原始先民声学水平的一个记录，这一精妙的原始调音技术也成为中华原始音乐声学技术成就的一个重要标记。

四、骨笛测音数据准确性标定

为慎重起见，我们又采用动态测音技术，对此前发表的两次测音数据进行了准确性标定。

下图是 M282：20 号骨笛演奏河北民歌《小白菜》的波形图。利用专门的测音软件对这一段乐曲进行动态测音，从而得到动态的测音结果如表 22 所示。这一段乐曲曾经在《自然》杂志的网站上发表。

表 22 是动态测音数据与已有静态测音数据的对比，从表中数据可以看出，动态测音和静态测音的数据之间吻合的较好，一般误差不超过 20 音分。这说明，专门测音的频率结果和实际演奏得到的频率结果基本一致，静态测音数据可以较为真实地反映骨笛实际演奏的声音原貌，黄翔鹏与萧兴华分别主持的两次测音均较为严谨，其数据都是可信的，在此数据基础上分析推断出来的结论也应当具有充分的依据和说服力。



图二

表 22

（单位：音分）

音孔位	动态测音	静态测音（开小7孔）	偏差
1孔	A6+29	A6+41	12
2孔	#F6+15	#F6+40	25
3孔	E6-12	E6+1	13
4孔	D6-7	D6	7
5孔	C6+6	C6+5	1
6孔	B5-55	B5-41	14
7孔	A5-7	A5-1	6

五、小 7 孔调音功能及其科学价值

通过上述数理分析，可以认为，M282:20 号骨笛的小 7 孔应是一调音孔。以现代音乐声学的眼光来看，它具有以下作用：1. 调整 7 孔音高，使它能和骨笛“主音”C6 之间相协调；2. 调整 7 孔与筒音之间音程，使它与筒音间的音程误差减小了 32 音分，较好地达到小三度；3. 改变整个骨笛的音阶结构，使超吹后的骨笛可以旋宫转调，实现八度超吹，用斜吹法至少可以演奏两个八度；4. 全面改善骨笛各音孔音准，虽然这一效果不太可能人为预先设定，但想来当时的制造者发现这一现象后也会有意外的欣喜。

综上所述，有理由认为，贾湖骨笛中的这个独一无二的小孔，代表着中国原始先民调音技术的音乐声学水平，它既是中国上古先民原始科学技术聪明才智的体现，也是中华原始音乐文化灿烂精华的结晶。贾湖骨笛中不但出现了标准音高系列的 C6，而且还巧妙地利用小 7 孔将第 7 孔的音高调整到与中央 C 相距一个小三度（300 音分）的 A5，虽然这也许都只是无意间的一个巧合，但至少从某种程度上说明，中国先民对音乐频率关系已经具有某种特殊的敏感。贾湖骨笛迄今为止已出土三十余根，绝大多数骨笛都具有实际演奏的功能，据此推测，当时比较专业的骨笛演奏家们应该已经发现超吹技术，因此，他们也可能很早就面对旋宫转调的问题，M282:20 号骨笛的小孔，也透露了中国人最早的旋宫转调的音乐实践信息，联想到此后数千年延绵不断的中华音乐声学传统，使我们对中华先民的原始音乐声学成就，又有了新的认识。

正如萧兴华先生曾经提出的，贾湖骨笛的发展过程是由少孔到多孔，音阶关系是从粗犷到细腻⑬。在这个过程中，小 7 孔及其调音技术的出现占据着重要的一环。这一环连接着骨笛的少孔到多孔，也连接着音阶的粗犷到细腻，还连接着骨笛的高音区和低音区。我们可以毫不犹豫地说，小孔虽小，意义重大，它是中国原始音乐声学成就的一个活的化石。

作者附言：感谢美国布鲁海文国家实验室 Garman Harbottle 先生多年来的大力支持与合作；戴念祖先生曾经给予过多方支持，谨此诚表感谢！

作者单位：中国科学技术大学人文学院

参考文献：

1. 黄翔鹏《舞阳贾湖骨笛的测音研究》，《文物》1989 年第 1 期。
2.《舞阳贾湖》，北京：科学出版社 1999 年版。
3. 缪天瑞《律学》，北京：人民音乐出版社 1996 年第三版。
4. 吴钊《贾湖龟铃骨笛与中国音乐文明之源》，《文物》1991 年第 3 期。
5. 萧兴华《中国音乐文化文明九千年》，《音乐研究》2000 年第 1 期。

---

⑬ 同注①，第 1020 页。